

26

Florestas energéticas

Osmir José Lavoranti

Antônio Francisco Jurado Bellote

Cláudio César de Almeida Buschinelli

Flávio José Simioni

Guilherme de Castro Andrade

Helton Damin da Silva (in memoriam)

José Otávio Brito

Jorge Ribaski

Mônica Caraméz Triches Damaso

Paulo Eduardo Telles dos Santos

Sônia Couri

Introdução

Em 2006 foram editadas as Diretrizes de Política de Agroenergia pelo Governo Federal Brasileiro. A Embrapa, atendendo orientação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), incluiu no seu programa de pesquisa estratégica para o Brasil, a Plataforma de Agroenergia. Nessa ocasião, à Embrapa Florestas foi delegada a responsabilidade de elaboração de um projeto em rede que teve sua primeira fase iniciada em 2007 e a segunda em 2011. A conclusão desse projeto ocorreu em 2016 e contou com a participação de 120 pesquisadores, 21 Unidades da Embrapa, 17 universidades, 11 empresas públicas e privadas, 2 instituições de pesquisa e 2 cooperativas.

Os objetivos do projeto foram aprimorar tanto a matéria-prima, com uma maior disponibilização de material genético, quanto as técnicas de silvicultura para o rendimento da biomassa florestal como fonte de energia, bem como trabalhar competências regionais em todo o País, a partir da qualificação técnica. Os desafios foram a produção da biomassa florestal em grande escala e o desenvolvimento de tecnologias para a conversão de biomassa em energia mais sustentável.

A base do projeto foi a cultura do eucalipto. Os pesquisadores detectaram a necessidade de avaliar diferentes materiais genéticos no Brasil, para gerar mais informações sobre o comportamento de espécies em uma região específica, visando uma maior produtividade de biomassa florestal e, conseqüentemente, de energia. Isso ocorreu, por exemplo, nas regiões Nordeste e Centro-Oeste do País. Com o objetivo de alcançar uma densidade energética maior que aquela presente nos exemplares já existentes nessas áreas, foram introduzidos novos materiais genéticos nestas duas regiões. No Centro-Oeste, onde há limitação da qualidade do solo, mas não de quantidade de chuva, os pesquisadores optaram pela espécie *E. urophylla* que já era trabalhada em São Paulo e que rendia 20% mais energia pela mesma quantidade de biomassa.

No caso do Nordeste, em que o eucalipto existente na região apresenta um desenvolvimento considerado aquém do esperado, o projeto visou aumentar o rendimento da biomassa florestal naquele local. Foram introduzidas as espécies *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* e *E. crebra*, com material genético procedente de regiões mais áridas da Austrália, e na Chapada do Araripe, região mais favorável para a silvicultura de eucaliptos, com precipitação pluviométrica média anual de 750 mm, dois híbridos foram testados no município de Araripina-PE: *E. brassiana* x *E. urophylla* e *E. grandis* x *E. camaldulensis*. Os testes foram conduzidos em conjunto com a iniciativa privada brasileira, introduzindo essa nova alternativa, que já rendia 23 metros cúbicos de madeira para energia, contra os cinco metros cúbicos de madeira obtida da Caatinga. Esse procedimento pode contribuir para a diminuição da pressão de consumo sobre a floresta nativa, como fonte disponível de biomassa para energia, além de propiciar uma maior produtividade de madeira, impactando aspectos sociais e chegando ao

objetivo maior de aumentar a participação deste tipo de fonte de energia na matriz energética.

Outro desafio do projeto foi atuar na parte tecnológica para a transformação da biomassa florestal em energia, como é o caso da produção de carvão que, atualmente, possui técnicas com baixos rendimentos, altos níveis de poluição e que geram impactos sociais negativos. Tendo em vista que o carvão e a lenha têm participação de 12% na matriz energética brasileira, os pesquisadores decidiram melhorar esses processos de produção, focando pequenos e médios produtores. Em 2012, o País consumiu 400 mil metros cúbicos de carvão. Estima-se que 55% de toda a madeira consumida no Brasil seja destinada à energia utilizada na preparação de alimentos, secagem de grãos e usinas termoeletricas.

Durante a execução do projeto foi desenvolvido um layout de fornos para pequenas produções de carvão (dois a três metros cúbicos), sem a emissão de gases de efeito estufa, a partir da queima desses gases. Trata-se de forno que emite apenas vapor d'água (Oliveira, 2013). Outro objetivo foi desenvolver um forno com a mesma tecnologia, mas para o médio produtor. Nesse caso, o forno teria quatro unidades separadas para a realização de um processo contínuo, sem que o produtor precisasse esperar a finalização de cada etapa da transformação da madeira em carvão (carbonização, resfriamento, preparo do carvão e secagem – nessa etapa, gases gerados por todo o processo, que são queimados para evitar sua emissão para o ambiente, resultam em energia utilizada na secagem, de maneira uniforme dentro do forno, aumentando o rendimento energético). Assim, com a otimização do processo por meio desse modelo de forno, tornou-se possível produzir até 30 metros cúbicos de carvão (Cardoso et al., 2010).

Os pesquisadores também desenvolveram um protótipo de fogão a lenha que retém mais energia gerada a partir da queima da madeira (Avanços..., 2016a). Essa atividade foi realizada em conjunto com as Universidades do Pará e de Mato Grosso do Sul. A iniciativa teve uma grande importância, porque cerca de 15 milhões de brasileiros ainda dependem do fogão a lenha para a cocção de alimentos. Além disso, nos fogões utilizados atualmente, somente 10% da energia gerada pela queima da lenha é aproveitada no local. Os pesquisadores desenvolveram também um protótipo de fogão que não resulta em emissões de metano, originadas pela queima da madeira (Avanços..., 2016a). Esse trabalho segue em continuidade nas referidas universidades parceiras.

Paralelamente, os integrantes do projeto Florestas Energéticas trabalharam na normatização do carvão vegetal, incluindo as regras de comercialização. Os dados levantados foram estudados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para a criação de normas ao setor (<http://www.abnt.org.br/noticias/4078-abnt-elabora-normas-de-carvao-vegetal>). Entre os aspectos divulgados está a identificação da origem do carvão, principalmente pelos agentes fiscalizadores. Um dos objetivos deste

trabalho foi coibir a produção ilegal de carvão a partir de florestas nativas. Atualmente, cerca de 50% da matéria-prima para a produção de carvão vêm de florestas ilegalmente cortadas.

Além da lenha e do carvão, o projeto buscou novas tecnologias para a produção de energia com alto valor agregado. O objetivo foi oferecer um desempenho ainda melhor na geração de energia e, conseqüentemente, intensificar o uso da biomassa florestal na matriz energética brasileira. A pesquisa avaliou outros produtos a partir da biomassa das florestas para conseguir melhores rendimentos energéticos, como o etanol a partir da madeira, o bio-óleo e também a celulolignina, resultado da junção das moléculas de celulose e lignina, transformadas em um composto sólido com uma densidade energética dez vezes maior que àquela da madeira in natura (Avanços..., 2016b). Os pesquisadores aproveitaram uma tecnologia similar, feita no Rio Grande do Sul a partir da palha do arroz, e adaptaram o método para a madeira. A maior aplicação da celulolignina seria para termoelétricas, que ganhariam uma alternativa à madeira utilizada. A celulolignina é mais fácil de ser transportada e tiraria a obrigatoriedade da presença de florestas ao lado das termoelétricas, o que é necessário para atender a demanda desse tipo de processo de geração de energia.

O projeto ainda identificou dois subprodutos do bio-óleo, sendo que um deles pode ser utilizado diretamente como fonte de energia. Os finos de carvão que, depois de um processo de compactação (briquetagem), são transformados em carvão de altíssima densidade energética. O outro subproduto é o extrato ácido, que pode ser aplicado como defensivo agrícola (Avanços..., 2016b).

O maior desafio do projeto, entretanto, foi a produção em larga escala do etanol a partir da madeira. O processo que, por hidrólise, transforma as moléculas de lignina e celulose em açúcar já é conhecido, mas acontece apenas em laboratório e com um alto custo. O encarecimento ocorre pela produção de enzimas (a partir de microorganismos) essenciais para a transformação da madeira em álcool (Avanços..., 2016b).

Os pesquisadores destacaram, ainda, como tecnologia futura promissora, a produção de hidrogênio a partir da madeira. Já há estudos mais aprofundados sobre o assunto na China e nos Estados Unidos, e o Brasil pode ser beneficiado com essa tecnologia, diante do potencial do uso da biomassa florestal e da demanda de hidrogênio da Petrobras (Avanços..., 2016b).

O projeto Florestas Energéticas ainda abordou, por meio de ações transversais voltadas para a sustentabilidade, estudos da cadeia produtiva relacionados à madeira para fins energéticos e avaliou os impactos sociais e ambientais na aplicação dessas tecnologias de geração de energia.

O Projeto em rede Florestas Energéticas trouxe uma série de benefícios e oportunidades que tiveram como principal desdobramento a consolidação, por meio da liderança da Embrapa, de uma rede multi-institucional e multidisciplinar com pesquisadores atuando nas quatro regiões brasileiras. Essa equipe, capacitada a desenvolver

tecnologias e envolvida em participações de eventos técnico-científicos, comissões públicas e privadas, ações de transferência de tecnologias, contatos com empresas, produtores e assistência técnica, identificou novas demandas de pesquisa que vão além da mera transformação da biomassa florestal em produtos energéticos. A visão é a ampliação dos estudos de produção de biomassa florestal e sua conversão visando não apenas o uso energético, mas também a geração de produtos químicos e materiais, em um conceito de Biorrefinaria Florestal.

Com amplitude nacional e subdividido em cinco projetos componentes e inter-relacionados, a primeira fase desse projeto (Fase I) teve como grandes desafios a produção da biomassa em escala e o desenvolvimento de tecnologias de conversão de biomassa em energia. O objetivo principal do projeto foi desenvolver, otimizar e viabilizar alternativas ao uso de fontes energéticas tradicionais não renováveis, por meio da biomassa de plantações florestais, contribuindo para a ampliação da matriz energética nacional de forma sustentável.

Os objetivos específicos foram:

- Estruturar, nas diversas regiões do País, populações de espécies florestais para oferta de germoplasma com tecnologias silviculturais apropriadas e necessárias à expansão de plantio de florestas para a produção de biomassa, em quantidade e qualidade apropriadas para uso energético;
- Desenvolver, otimizar e viabilizar alternativas de uso da biomassa florestal, como fonte renovável, para diversificar a matriz energética nacional de forma sustentável;
- Obter produtos de alto valor agregado da biomassa florestal, destinados à geração de energia, por meio do aprimoramento de tecnologias ou ajustes de processos para a obtenção de um extrato enzimático rico de atividade celulolítica e seu efeito na hidrólise de uma matriz lignocelulósica pré-tratada, pirólise, acidólise e oxidação parcial utilizando a mesma matriz;
- Efetuar estudos sobre a viabilidade, competitividade e sustentabilidade das cadeias produtivas de plantios florestais energéticos, bem como dos co-produtos resultantes na obtenção de biocombustíveis.

Durante o período de execução do projeto, foram desenvolvidas tecnologias e obtidos conhecimentos marcantes que geraram cerca de: 200 trabalhos técnicos e científicos; 40 reuniões técnicas realizadas com o objetivo de promover discussões relacionadas à sustentabilidade da cadeia produtiva das florestas plantadas com finalidades energéticas, por meio da difusão de conhecimentos silviculturais, aperfeiçoamento e inovações tecnológicas nos processos agroindustriais, diversificação da matriz energética com a obtenção de bioprodutos de alto valor agregado e bioenergia de segunda geração e inserção de pequenos e médios produtores no agronegócio florestal; 20 dissertações/teses; 50 estágios de graduação/pós-graduação; 200 ações de

transferência de tecnologia; 270 atividades de promoção da imagem e 10 eventos, dos quais se destaca o 1º Congresso Brasileiro sobre Florestas Energéticas. O Congresso foi o marco para a sedimentação do tema Florestas Energéticas no cenário nacional e para a consolidação da rede de pesquisadores. Soma-se a isso a participação efetiva da equipe nos seguintes contextos: no Programa de Agricultura de Baixo Carbono, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa); no fórum de Carvão Vegetal da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, do Ministério da Economia (MDIC); na normatização do carvão vegetal da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT); nos Comitês Gestores dos Grupos sobre Carvão Vegetal do MDIC; no Polo de Excelência em Florestas da Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior do estado de Minas Gerais (SECTES/MG); na Câmara Setorial da Cadeia Produtiva de Florestas Plantadas do Mapa.

Quanto às tecnologias desenvolvidas, destacam-se: a oferta de genótipos para as diversas regiões brasileiras: para a região Sul, *E. benthamii*, *E. badjensis*, *E. dunnii*; para a região Sudeste, *E. urophylla* (clones AEC 144, AEC 224), híbrido “urograndis” (clone FO 2070), *E. cloeziana*, *C. maculata*; para a região Centro Oeste, *E. urophylla* (clones AEC 144, AEC 224), híbrido “urograndis” (clone H13), *E. pellita*, *E. cloeziana*, híbrido “torelliodora”; para a região Nordeste, *E. brassiana* x *E. urophylla* (clone), *E. grandis* x *E. camaldulensis* (clone), *E. tereticornis*, *E. crebra*, e para a região Norte, *E. urophylla* (clone AEC 144), o híbrido “urograndis” (clone H13) (Germoplasmas..., 2016); protocolos silviculturais para regiões carentes de tecnologia, práticas e processos agropecuários em sistemas de integração (ILPF) (Tecnologias..., 2016); peletizadora de resíduos da exploração florestal; carbonizador para a produção de carvão vegetal; equipamento de compactação de biomassa; metodologia de identificação da origem do carvão vegetal (Avanços..., 2016b); desenvolvimento de processo de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica; aproveitamento de lodos primários de empresas de reciclagem de papel para a produção de etanol; metodologia para determinação de etanol por meio de NIR; criação de um produto combustível derivado de madeira (celulignina); produção de bio-óleo; seleção de linhagem de micro-organismo para a produção de extrato enzimático; conversão de celulose em açúcar em resíduos celulósicos e da polpa de celulose (Avanços..., 2016a).

O projeto

- **Florestas energéticas na matriz de agroenergia brasileira (2007-2011).**
Líderes: Helton Damin da Silva (2007/2008); Antonio Francisco Jurado Bellote (2009/2011)
- **Produção e conversão sustentável de biomassa em energia (2011-2016).**
Líder: Antonio Francisco Jurado Bellote

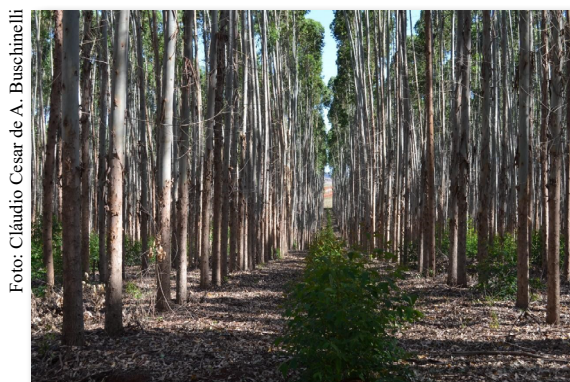


Foto: Cláudio Cesar de A. Buschinelli

Figura 1. Talhão de híbrido “urograndis” com 8 anos e manejo para lenha e madeira (29/10/2013), Itapeva, SP.

A humanidade apresenta dependência energética proveniente de carbono fóssil, que representa aproximadamente 86,4% da necessidade energética global. Desse total, 36% corresponde ao petróleo, 27,4% ao carvão mineral e 23% ao gás natural (U.S. Energy Information Administration, 2020). Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, na matriz energética brasileira, o carbono fóssil representa 56,6%, sendo petróleo 43,1%; carvão mineral 6% e gás natural 7,5%. Destaca-se que as fontes renováveis têm grande contribuição, sendo que a energia elétrica participa com 14% e a produção de biomassa tradicional com 8,5% (Brasil, 2019).

O caráter finito das fontes petrolíferas e o excesso de poluição proveniente da energia derivada de petróleo estimula a sociedade global a pressionar por uma busca de energia limpa, das quais as mais evidentes são a biomassa, energia solar, energia eólica, energia dos oceanos e energia nuclear.

O Plano Nacional de Agroenergia elaborado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), com o apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), tem ressaltado os pontos positivos e negativos e as reais possibilidades de participação de cada fonte da matriz energética. Nesse contexto, é possível observar que as fontes renováveis, apesar dos custos altos de obtenção, riscos

de intermitência, distribuição desigual e estágio tecnológico inferior às demais fontes em uso, apresentam aspectos positivos em relação à sustentabilidade dos sistemas produtivos.

A demanda brasileira por energia final, incluindo fontes oriundas de produtos agrícolas e florestais, hidroelétricas, eólicas, geotérmicas, solar e energia dos oceanos, deverá crescer 2,6% ao ano, nas duas próximas décadas, não considerando as interferências de políticas públicas ou de pressões sociais (Brasil, 2018). A biomassa representa a maior fonte sustentável de energia renovável, composta por 220 bilhões de toneladas de matéria seca anual disponíveis para uso energético.

O suprimento de madeira ao mundo provém, na sua maior parte, das florestas naturais (65%), sendo apenas 35% provenientes das florestas plantadas, demonstrando ainda a grande pressão de consumo existente sobre as florestas naturais. O Brasil possui, aproximadamente, 7,8 milhões de hectares de florestas plantadas, das quais 5,7 milhões são florestas de eucalipto presentes, principalmente, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%). A demanda brasileira situa-se ao redor de 350 milhões de metros cúbicos de madeira, sendo que as florestas de eucalipto suprem apenas um terço do total da demanda anual e atual de madeira (IBÁ, 2019).

A participação das florestas plantadas no Brasil tem crescido sensivelmente nos últimos anos, principalmente no segmento de celulose e papel, onde 100% da madeira provém do reflorestamento com o eucalipto e pinus. Em 2018, o consumo brasileiro de madeira proveniente de árvores plantadas para uso industrial foi de 220,9 milhões de m³, o que representa um aumento de 7,2% em relação ao consumo de 2017 (IBÁ, 2019).

Para a indústria do carvão vegetal, a área de florestas plantadas, principalmente com o eucalipto, cresceu de 73% em 2012, para 91% em 2018. O Brasil é responsável por 11% de todo o carvão vegetal produzido no mundo e o segmento de siderurgia a carvão vegetal responde por 12% de toda área plantada (IBÁ, 2019).

O consumo de lenha para geração de energia deverá concentrar-se, ainda, na demanda crescente dos setores da agroindústria rural, na secagem de grãos, chá ou tabaco, na produção de tijolos e na indústria cerâmica.

A conversão de energia e o acesso à sua utilização estão entre os grandes desafios de nosso tempo, incluindo a sustentabilidade, a qualidade ambiental, a segurança e a qualidade de vida, além da melhoria dos processos, resultando em melhores índices de conversão da biomassa em energia.

A principal utilização da madeira para energia encontra-se atrelada à sua combustão direta, na forma sólida, destinada à geração de calor para diversos fins. Nesse contexto, estão incluídos os tradicionais fogões a lenha, até as mais modernas caldeiras geradoras de vapor, que operam a combustão em leito fluidizado.

No campo das transformações, a pirólise surge como instrumento fundamental, por exemplo, para os processos de termorreificação e de carbonização da madeira. Na mesma proporção, os processos de compactação permitem o adensamento energético e a melhoria das condições de armazenamento, de transporte e de rendimento energético de resíduos florestais e madeireiros. Mesmo considerando a existência de trabalhos para tais rotas, cabem ainda pesquisas que visem a aperfeiçoamentos, avanços e inovações tecnológicas (Avanços..., 2016a).

Países como Brasil, África e China utilizam, em larga escala, o carvão vegetal como fonte de energia e matéria-prima, especialmente para as indústrias siderúrgicas. No Brasil, milhões de metros cúbicos de madeira de origem nativa e plantada são destinados anualmente para a produção dessa importante matéria-prima. A siderurgia necessita de grandes quantidades de carvão vegetal. Um problema relacionado ao uso do carvão vegetal é a sua variabilidade em qualidade, uma vez que esse produto sofre grande influência das características químicas, anatômicas e físicas da madeira e do processo de carbonização. A variabilidade ocasiona desperdício do material, podendo inclusive dificultar a operação dos altos fornos siderúrgicos. Nesse contexto, a seleção de novas matérias-primas deve levar em consideração as informações relacionadas a essas características. Também se faz necessário desenvolver protótipos de sistemas de carbonização que, além do aumento da produtividade, dispendam menores esforços físicos dos trabalhadores e proporcionem condições mais próprias e dignas de trabalho.

No processo de desenvolvimento de novas tecnologias, a biotecnologia é uma ferramenta poderosa no auxílio aos questionamentos impostos por esses desafios. A biotecnologia tem demonstrado que é capaz de originar os mais importantes e inovadores processos de conversão de energia. Como exemplo, a celulose é a fonte biológica natural renovável mais abundante do planeta, e a produção de produtos e bioenergia baseada na matriz lignocelulósica é importante para o desenvolvimento sustentável do ser humano. Há uma grande variedade de oportunidades bioenergéticas, tecnologias e aplicações a serem consideradas. Como fontes de celulose, têm-se as florestas plantadas, notadamente as de eucaliptos, a agricultura e os resíduos agroflorestais. Como tecnologias disponíveis, estão a combustão de material lignocelulósico, a gaseificação, a pirólise e a digestão anaeróbica que podem ser direcionadas para diversas aplicações, tais como: a geração de eletricidade, de calor e para o setor de transporte na substituição dos derivados do petróleo.

O aproveitamento da lignocelulose na produção de energia ainda depende de procedimentos que reduzam o custo de produção e, ou aumentem a atividade das enzimas hidrolíticas, assim como o aperfeiçoamento na construção de biorreatores para o uso da fermentação semissólida em escala comercial.

O conceito de biorrefinaria, ou seja, de completa utilização da biomassa, já tem sido discutido pelos pesquisadores e o seu desenvolvimento será de fundamental

importância para a sustentabilidade. Além disso, propiciará a produção e a comercialização de *biocomodities* que são idênticas, ou exercem função similar, às *commodities* produzidas pela indústria petroquímica. Assim, a fração celulósica e hemicelulósica são hidrolisadas e os açúcares fermentescíveis produzidos podem ser convertidos em variados produtos. Já a fração de lignina pode ser usada como combustível e funcionalizada ou craqueada para a obtenção de estruturas aromáticas.

Outros produtos tais como o bio-óleo in natura praticamente não têm outra aplicação a não ser o seu uso como insumo energético. Um exemplo disso é a queima direta em fornalhas para aplicação térmica em caldeiras ou geração de vapor no processo “ciclo vapor” (ciclo Rankine), como faz a empresa V&M Tubes de Minas Gerais com o alcatrão de carbonização de eucalipto. Outra aplicação consiste na geração elétrica em turbinas a gás, como faz a empresa Dynamotive do Canadá, em escala demonstrativa, com o uso das turbinas de 2,5 MW, e da Orenda, especialmente desenvolvidas para o uso do bio-óleo de pirólise rápida de biomassa. Entretanto, a introdução de um combustível na matriz energética veicular e mesmo de motores estacionários é uma tarefa difícil no curto prazo. Da mesma forma que o petróleo, o bio-óleo pode ser fracionado e utilizado como insumo pelas indústrias químicas, farmacêuticas e de alimento (Mesa-Perez, 2004).

Um dos subprodutos do processo de pirólise é o extrato ácido, uma solução aquosa que, diluída em água, é aproveitada em áreas agrícolas. A solução funciona como um bioestimulante em culturas como a soja e o café e na fruticultura (laranja, caqui e maracujá, por exemplo). O uso do extrato ácido na agricultura possibilita reduzir em até 50% o uso de agrotóxicos e de adubos químicos, sem perda de eficiência (Rezende, 2002).

Atualmente, existe uma demanda muito grande no Brasil para a produção de carvão mediante o emprego de resíduos vegetais. O carvão de resíduos vegetais obtido pelo processo de pirólise rápida em leito fluidizado é um carvão em forma de pó. Por meio do processo de briquetagem do carvão vegetal com o uso de aglutinantes, ou seja, utilizando uma técnica que envolve balanceamento granulométrico, mistura proporcional de aglutinante, compactação e secagem, consegue-se o aproveitamento dos finos de carvão na forma de um combustível mais homogêneo, de melhor densidade, granulometria uniforme, maior resistência mecânica e baixa geração de finos. Ao mesmo tempo, são mantidas as características energéticas do carvão, além do seu manuseio, estocagem e utilização tornarem-se facilitados e seu transporte poder ser feito em maiores distâncias. Apesar de ser o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo, o Brasil não possui tradição industrial na produção de briquetes de carvão (Brasil, 2019).

O combustível catalítico denominado celulignina apresenta características adequadas para a geração de energia por ciclo combinado e para obtenção de gás de síntese para a produção de combustíveis (metanol e outros). A celulignina é obtida

por via da pré-hidrólise ácida, em reator piloto de aço revestido com titânio, apto a suportar as condições agressivas do meio reacional.

A busca de soluções para reduzir a dependência do petróleo, considerada por muitos como em processo de superação como fonte energética pelo esgotamento das reservas, bem como pelos impactos ambientais decorrentes de sua utilização, aponta para as fontes renováveis de energia, entre elas a madeira. O setor florestal tem a oportunidade de contribuir para a composição da matriz energética nacional, a partir do momento em que se pretende atuar no desenvolvimento de produtos e processos tecnológicos destinados ao aumento do uso de fontes renováveis de energia. Nesse contexto, há a necessidade de se realizar pesquisas sobre qualidade específica da madeira de florestas plantadas e, ou nativas manejadas para os seguintes fins: aplicações energéticas; aperfeiçoamentos e inovações no campo da compactação de resíduos florestais e madeireiros, visando maior agregação energética; aperfeiçoamentos e inovações em equipamentos usados para combustão direta da madeira em ambientes residenciais e em pequenos empreendimentos industriais; produção de madeira termorretrificada; aperfeiçoamentos e inovações em equipamentos usados na produção de carvão vegetal.

A cadeia produtiva de biomassa florestal do Brasil tem a oportunidade de gerar vários produtos (madeira, lenha, carvão, celulose, chapas de fibras, bio-óleo, eletricidade etc.), muitos dos quais geradores de energia capazes de substituir, com vantagens sociais, ambientais e econômicas, os derivados de petróleo (Produção..., 2016). Destaca-se também a crescente e inevitável conscientização dos povos com relação à necessidade de preservação e conservação dos recursos naturais do planeta.

Um dos problemas da pesquisa é examinar o desempenho atual (em termos de eficiência produtiva e qualidade de produtos) de cada um dos produtos passíveis de serem incorporados à matriz energética, determinando alguns indicadores-chave e fatores críticos de desempenho. Com base nesses indicadores, é possível extrapolar as possibilidades potenciais de operação desses produtos na obtenção de biocombustíveis, sempre tendo como referência a viabilidade, competitividade e a sustentabilidade.

A potencialidade técnica da produção de biomassa para energia, enquanto fonte renovável, torna-a capaz de atender grande parte da demanda incremental de energia do mundo, independente da origem da demanda (eletricidade, aquecimento ou transporte). Aspectos importantes devem ser salientados: a viabilidade econômica, a sustentabilidade de cada fonte e a disponibilidade de recursos renováveis para geração de energia. O potencial e a origem ou fonte de geração de energia variam de região para região. Assim, as regiões tropicais possuem forte incidência de radiação solar, enquanto as áreas planas, em especial as costeiras, apresentam maior potencial eólico. O lixo e os resíduos orgânicos estão disponíveis em abundância e é efeito direto da urbanização.

No caso do Brasil, a principal vantagem ocorre no setor de produção primária, notadamente na produção de biomassa. Poucos países dispõem de condições de área em abundância, capazes de produzir de forma sustentável uma gama de culturas, entre elas a cultura florestal, sem competir com outros usos da terra como alimentação, lazer, moradia, vias de transporte, reservas etc.

Desde a década de 1990, a biomassa aparece como fonte potencial energética, tendência esta que transporece nos inúmeros trabalhos de cenarização que apontam-na como uma das principais fontes de energia do século XXI (Produção..., 2016). Diversos estudos de cenários indicaram que, entre 2025 e 2050, a participação da biomassa na matriz deverá variar entre 7% e 27% (Brasil, 2018)

O uso da biomassa para sequestro de carbono é ponto pacífico, sendo que o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) estima que 60 a 87 bilhões de toneladas de carbono poderão ser estocadas em florestas entre 1990 e 2050, equivalendo a 12-15% das emissões por combustíveis fósseis, no mesmo período (Crédito..., 2012).

Diante da necessidade de aumentar a oferta de madeira de florestas plantadas, torna-se imprescindível introduzir ou aperfeiçoar técnicas que contribuam eficientemente para o aumento da produtividade e melhoria da qualidade das plantações, conferindo sustentabilidade aos sistemas de produção sem prejuízos ao ambiente.

Os projetos componentes

- **Formação de base silvicultural para expansão de plantios florestais necessários à matriz de agroenergia brasileira (2007-2011).**

Líder: Paulo Eduardo Telles dos Santos.

- **Germoplasmas para expansão da base florestal energética (2011-2016).**

Líder: Paulo Eduardo Telles dos Santos.

Figura 2. Teste de progênies de *Eucalyptus benthamii* sob manejo silvicultural visando futura produção de sementes melhoradas, instalado em parceria com a empresa Golden Tree Reflorestadora em Candói, PR. Idade: 5 anos.



Foto: Paulo Eduardo Telles dos Santos

O Brasil é um País de dimensão continental e, por essa razão, diverso em termos de condições climáticas e tipos de solo. Praticamente em todos os biomas brasileiros, a vegetação nativa tem sido a garantia de suprimento de lenha para o atendimento de necessidades básicas das comunidades rurais.

De acordo com a projeção da população do Brasil pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em 2020, a população brasileira conta com aproximadamente 211 milhões de habitantes (IBGE, 2020), sendo que 16% da população vive no meio rural, segundo pesquisa apoiada pelo Ministério de Desenvolvimento Agrário em 2015. Por esse motivo, o consumo de madeira como fonte primária de energia ainda é importante para a sobrevivência de um enorme contingente de pessoas que dependem dessa matéria-prima para o preparo de alimentos e aquecimento de ambientes durante o inverno. Mesmo nas cidades, a lenha é ainda intensamente utilizada em padarias e outros estabelecimentos comerciais do ramo de alimentação. No setor industrial, a biomassa florestal vem sendo utilizada em caldeiras para a geração de vapor e obtenção de energia elétrica, em processos de aquecimento de água, secagem de produtos, defumação, fundição, calcinação, entre outras utilizações diretas.

Dentre as espécies florestais, o eucalipto é o material mais plantado no território nacional, ocupando uma área superior a 5,7 milhões de hectares (IBÁ, 2019). A produtividade anual média nas condições aptas situa-se acima de 35 m³/ha/ano de madeira, desde que ocorra pelo menos 1.000 mm anuais de precipitação pluviométrica. A madeira produzida é destinada para celulose/papel, geração de energia (na forma primária), biorredutor na siderurgia, manufatura de painéis à base de madeira reconstituída, obtenção de peças roliças, produção de sólidos madeiráveis a partir de serrados e laminados. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, bem como os avanços técnicos em processos já conhecidos, a produção de bio-óleo, celulignina catalítica, gases de síntese (singás) e álcool a partir da celulose vêm assumindo papéis estratégicos e complementares aos atuais usos da madeira para fins energéticos (lenha e carvão).

Os germoplasmas de eucalipto economicamente importantes para as condições brasileiras constituem um número relativamente pequeno de materiais, apresentando variações quanto às procedências geográficas nos países de origem e locais de produção das sementes. Verifica-se uma tendência de aumento no uso de clones híbridos, uma vez que os programas de melhoramento nacionais têm enfatizado o uso dessa estratégia para mesclar características de interesse (adaptativas, crescimento, silviculturais e qualidade da madeira), explorar a heterose para taxa de crescimento e uniformizar a matéria-prima.

Além do eucalipto, várias espécies arbóreas possuem características vantajosas para uso energético, muito embora ainda não se conheçam todas as propriedades tecnológicas da madeira que as qualifiquem de forma mais contundente para essa finalidade.

Ao serem consideradas outras espécies arbóreas potenciais para fins energéticos, tais como o taxi-branco, *Acacia mangium*, angico-de-bezerro e mulateiro, entre outras potencialmente utilizáveis, o nível de informação é bastante rudimentar. Deve-se destacar que ainda não existem programas de melhoramento genético para esses materiais, estando a pesquisa num nível inicial, ou seja, restritas à identificação das melhores procedências quanto à adaptação e crescimento, ao estabelecimento de protocolos silviculturais e à avaliação preliminar de qualidade de madeira.

Na nova conjuntura que se pretende desenhar para a agricultura familiar, por meio da disseminação do modelo de arranjos produtivos locais, o item “energia” passa a fazer parte do contexto. Nesse sentido, a presença do componente arbustivo-arbóreo nas propriedades rurais passa a ser inevitável. Produtividade, rusticidade, baixo consumo de defensivos agrícolas e pequena necessidade de mão de obra constituem-se fatores favoráveis ao se adotar sistemas que contemplem a utilização de árvores.

Para os grandes empreendimentos empresariais, voltados para o agronegócio (agrícola ou florestal), a formação de plantações florestais a partir de germoplasmas produtivos, adaptados e de alto rendimento energético, que consubstanciem uma alta relação benefício-custo, constitui forte atrativo para diminuir a dependência de fontes não renováveis de energia.

Em qualquer situação, as instituições de pesquisa exercem um papel de suma importância. A continuidade das investigações em melhoramento genético, zoneamento climático e silvicultura são fundamentais, pois há muito que se avançar em termos de qualificação de matéria-prima para uso energético, melhoria de características da madeira, ajuste dos germoplasmas às condições de clima e de solo para fins de plantio, definição de espaçamento de plantio e idade de rotação, desenvolvimento de novas combinações híbridas e protocolos de clonagem, entre outros temas.

Para a obtenção de biomassa energética a partir de plantações florestais, a identificação de material genético com características mais apropriadas para a produção, a ampliação da oferta de material propagativo de qualidade e o desenvolvimento de sistemas silviculturais adequados para a obtenção de produtos energéticos constituem-se os principais desafios. Neste particular, vale destacar o esforço da pesquisa brasileira nas últimas três décadas, que elevou a produtividade média anual de 15-18 m³ ha⁻¹ para 35-45 m³ ha⁻¹ mediante seleção genética de árvores superiores, propagação massal vegetativa de clones, plantio com preparo conservativo de solo e adequada nutrição das plantas por meio da adubação química. Entretanto, a produtividade florestal expressa em volume de madeira não é a mais adequada para considerações energéticas, uma vez que as unidades utilizadas para avaliações do potencial energético são consideradas em unidades de massa (g, kg, t). Vale destacar que a madeira, por ocasião do corte, apresenta teor elevado de umidade, não devendo ser transportada e nem utilizada de imediato. Como exemplo, o corte de uma floresta efetuado com um clone de baixa densidade básica da madeira (0,40 g cm⁻³), aos sete anos de idade,

resultou em uma produtividade anual de $46 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e peso de 126 t sem casca (Seixas et al., 2005).

Para atribuir qualidade à biomassa produzida para fins energéticos, deve-se entender as propriedades relativas da madeira como combustível. Uma das mais importantes propriedades de um combustível é o seu poder calorífico, que usualmente é obtido medindo-se o calor liberado pela queima de uma quantidade conhecida de combustível.

O poder calorífico pode ser classificado em superior e inferior. A Norma Técnica NBR 8633 (ABNT, 1984) define o poder calorífico superior como sendo o número de unidades de calor liberados pela combustão de uma unidade de massa de uma substância, em bomba calorimétrica, em atmosfera de oxigênio, sob volume constante e sob condições específicas, de modo que toda a água proveniente da combustão esteja no estado líquido. O poder calorífico inferior é o calor efetivamente disponível por unidade de massa da madeira ou outro combustível e é calculado a partir do poder calorífico superior deduzindo-se as perdas de energia com a evaporação de água formada durante a combustão.

A densidade da madeira não tem correlação com o poder calorífico, entretanto determina o volume de biomassa a ser transportado e inserido nas fornalhas. Uma baixa densidade resulta em aumento de custos de transporte (maior volume), além de exigir mais trabalho na alimentação das fornalhas. Para a produção de lenha, em geral, a maior preocupação é o poder calorífico. Todavia, a maioria dos problemas na conversão da biomassa em energia pelo processo da combustão não estão relacionados com o poder calorífico superior. Os entraves mais comuns são o teor de umidade e a densidade da madeira.

A combinação da produtividade florestal ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) com poder calorífico (kcal kg^{-1}) e estas com densidade da madeira (kg m^{-3}) propiciam a geração de uma nova variável discriminatória denominada “produtividade energética” (kcal ha^{-1}), a qual, ao menos para a classificação de materiais quanto ao uso como fonte primária de energia (lenha e carvão), tem-se mostrado útil. Para os demais derivados e co-produtos energéticos, há necessidade de embutir determinações específicas, especialmente no mérito de características químicas da madeira (por exemplo: conteúdo de lignina, carboidratos, extrativos, cinzas, material volátil, enxofre, sódio, potássio, relação siringil/guaiacil, entre outras).

A umidade na biomassa absorve uma parte considerável da energia liberada na combustão do material lignocelulósico sendo, portanto, indesejável. Isso, em virtude de sobrar menos energia para a geração de energia elétrica, vapor de processo ou calor.

O teor de umidade da madeira varia entre 45% e 70% com base úmida e depende de fatores como espécie, clima, armazenamento, entre outros. Esta heterogeneidade torna o processo de combustão mais difícil. A madeira cortada e seca ao ar (por período entre seis meses e um ano) e abrigada das intempéries apresenta teor de umidade entre

15% e 25%. A madeira com teor de umidade acima de 65% não consegue entrar em combustão, sendo necessária uma fonte extra de energia para a secagem até níveis adequados.

Nas condições de Lavras-MG, duas árvores de eucalipto de 25 anos foram cortadas em toras de 2 m e secas ao ar livre por 240 dias, sendo demonstrado que a maior perda de umidade ocorreu nas primeiras duas semanas, sendo que, ao final do período, as toras mantidas com casca ainda apresentavam 19% de umidade, enquanto que as sem casca atingiram 17% de umidade, diante de uma umidade inicial de 73% e 83%, respectivamente (Rezende et al., 2010). Nesse estudo, após 80 dias os teores de umidade variaram de forma insignificante, praticamente se estabilizando.

As características de madeira para uso doméstico levam em conta classificações que não são usadas para aplicações industriais. Por exemplo, as seguintes propriedades são consideradas: facilidade para o corte e rachamento, facilidade de ignição, nível de fagulhas e nível de fumaça.

Um bom parâmetro para avaliar de forma rápida o conteúdo energético de lenhas é o uso do poder calorífico por unidade de volume de madeira, em vez da unidade de massa. Para tanto, basta multiplicar o poder calorífico pelo valor da densidade.

Ressalta-se que a madeira possui um teor de enxofre muito baixo e desprezível, não causando poluição significativa durante a queima por emissão de compostos sulfurosos, ao contrário dos combustíveis fósseis. O enxofre presente nos combustíveis gera, durante a combustão, principalmente o dióxido de enxofre que, combinado com a água das chuvas, resulta em ácido sulfúrico diluído, mas também produz outras substâncias potencialmente muito tóxicas.

A composição molecular da madeira é formada por três constituintes principais, a celulose, a lignina e as polioses. Além destes, ainda existem na madeira os extrativos que são responsáveis por algumas propriedades como cor, gosto, odor e durabilidade natural.

O poder calorífico é mais alto quanto maior for o teor de lignina e extrativos, porque os mesmos contêm menor teor de oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose e polioses). Quando a finalidade do uso da biomassa de origem florestal for a combustão ou a carbonização, o maior teor de lignina é desejável, o que não significa que a densidade não seja importante.

Para o caso da produção de álcool a partir de material lignocelulósico, o menor teor de lignina deve favorecer a hidrólise enzimática. A hidrólise enzimática visa a degradação dos polissacarídeos presentes na madeira em suas unidades monoméricas básicas, ou seja, os açúcares. Pelo processo da fermentação estes açúcares são transformados em álcool. Via de regra, antes do processo enzimático é necessário um pré-tratamento da madeira, a fim de expor os polissacarídeos à ação das enzimas. Muitos dos pré-tratamentos objetivam a remoção parcial da lignina, assim sendo, a composição química da lignina, além do seu teor, pode influenciar os mais diversos processos.

Com base no que foi descrito, depreende-se que, para uma apropriada definição dos materiais a serem cultivados para fins energéticos, além das características físicas e da composição química, outras condicionantes devem ser observadas, tais como a facilidade de propagação por mudas clonais ou por sementes, a perda de água no processo de secagem, as adaptações das espécies às condições locais, entre outros aspectos.

- **Desenvolvimento de tecnologias silviculturais para produção de florestas energéticas de eucalipto (2011-2016).**

Líder: Jorge Ribaski



Foto: Jorge Ribaski

Figura 3. Sistema de integração pecuária-floresta (sistema silvipastoril) implantado na Zona da Mata de Minas Gerais, visando à diversificação de renda na propriedade rural por meio da exploração de madeira e proporcionar conforto térmico ao gado leiteiro.

A contribuição do setor florestal na economia e no desenvolvimento do País é inegável. O Brasil é um dos líderes na produção de biomassa florestal para celulose, papel e energia. As florestas plantadas com as espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* destacam-se por serem a principal fonte de suprimento de madeira das cadeias produtivas de importantes segmentos industriais como os de celulose e papel, painéis reconstituídos, móveis, siderurgia com carvão vegetal, energia e produtos de madeira sólida.

As atividades do Setor de Florestas Plantadas podem ser consideradas um caso de sucesso dentre os diversos setores da economia nacional. O setor apresentou crescimento de 13,1% em 2018, alcançando uma receita setorial de R\$ 86,6 bilhões. Nesse mesmo ano, a área ocupada por plantios florestais, principalmente de *Eucalyptus* e *Pinus*, totalizou 7,83 milhões de hectares. Os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares desse total (73%), enquanto as áreas com pinus somam 1,6 milhão

de hectares, e outras espécies, entre elas seringueira, acácia, teca e paricá, representam cerca de 590 mil hectares (IBÁ, 2019)

O eucalipto, particularmente devido às características de rápido crescimento, produtividade, ampla diversidade de espécies, grande capacidade e adaptação e por ter aplicação para diferentes finalidades tem sido extensivamente utilizado em plantios florestais (Mora; Garcia, 2000). Deve-se ressaltar que sua área plantada continua em processo de expansão. Já para *Pinus* evidencia-se a tendência de estagnação ou até mesmo ligeira redução dos plantios, em parte devido à substituição dessas áreas por plantios de *Eucalyptus*, cujo rendimento em volume é superior ao dessa conífera.

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal e responsável por 11% de todo o carvão vegetal produzido globalmente (IBÁ, 2019), sendo os principais consumidores os setores de ferro-gusa, aço e ferros-liga e, em menor escala, o comércio e o consumidor residencial (Abraf, 2011). O carvão vegetal apresenta inúmeras vantagens em relação ao carvão mineral. É uma fonte de recurso renovável, menos poluente e a tecnologia para sua fabricação já está amplamente consolidada no Brasil.

Entretanto, em 2012, aproximadamente 40% da produção brasileira de carvão vegetal era proveniente de florestas nativas (Modernização..., 2015; IBÁ, 2019). Com a Lei do estado de Minas Gerais 18.365/2009, que alterou a legislação florestal daquele Estado, que é o maior produtor de carvão vegetal do País, e determinou a redução progressiva do consumo de produtos ou subprodutos originados da vegetação nativa, em especial o carvão vegetal. Assim, após essa medida, a cada ano o consumo de madeira nativa diminui, sendo substituída por madeira de florestas plantadas, em função do maior controle exercido pelos órgãos fiscalizadores e também pelo aumento das pressões sociais na preservação dos recursos naturais (Abraf, 2011).

Dessa forma, do total de carvão consumido em 2018, em torno de 90% foi produzido a partir de madeira oriunda de árvores plantadas. Esse é um significativo aumento (5,9%) em relação a 2017, confirmando a tendência de queda no uso de madeira de florestas nativas que já vinha sendo apresentada nos últimos anos (IBÁ, 2019).

Ainda em 2018, um dos mais importantes insumos da indústria siderúrgica, o carvão vegetal registrou consumo de 4,6 milhões de toneladas no Brasil, um aumento de 2,5% em relação a 2017, principalmente em função do aumento da atividade do setor (IBÁ, 2019). Conforme estudos das projeções de produção de gusa a carvão vegetal para 2020, valores mais conservadores, onde se utilizou um crescimento linear de 5% a.a., chegou-se a 11,0 milhões de toneladas para 2020 (Scherer, 2014). Para se atingir esses valores de produção de ferro-gusa, estima-se que sejam necessários estoques de madeira de florestas plantadas em torno de 35,6 milhões de metros cúbicos (Modernização..., 2015)

Por outro lado, dados do Relatório de Projeções do Agronegócio 2009/2010 a 2019/2020, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) indicam

elevado potencial de crescimento do agronegócio brasileiro para os próximos anos. Assim, a demanda pelo consumo de lenha e derivados da madeira para geração de energia, visando atender os setores da agroindústria localizada no meio rural, também deverá ter um crescimento significativo.

Espera-se que todo esse crescimento da produção agrícola brasileira ocorra por meio, principalmente, do aumento da produtividade, resultante do maior emprego de tecnologia, do aumento da eficiência dos fatores de produção e do uso de sistemas sustentáveis de produção. Entretanto, o que tem sido observado nesses últimos anos é que esses aumentos na produção têm acarretado uma grande demanda por recursos naturais (solo, água e florestas), os quais são explorados, muitas vezes, de modo não adequado, comprometendo a sustentabilidade da atividade agropecuária brasileira.

Em 2016, o último ano de uma série histórica, o Brasil figurava como o sexto maior emissor anual de gases de efeito estufa, mostrando a importância e a necessidade de o País adotar políticas de baixa emissão de carbono. Nos cálculos mais atuais, considerando os anos mais recentes, o Brasil passou a ser o sétimo maior emissor (Os países..., 2019), sendo a principal causa de emissão a derrubada e a queima das florestas naturais para dar lugar à agricultura ou pecuária. Dentre as áreas cultivadas após os desmatamentos, a maior porcentagem é ocupada por pastagens, sendo que boa parte delas se encontra degradada ou em processo de degradação, principalmente na Amazônia e no bioma Cerrado.

Nesses biomas, a pecuária, principalmente a bovinocultura, é uma das atividades que vêm sofrendo pressões para que adote sistemas de produção mais saudáveis ambientalmente. Sob o risco de perder a competitividade, ela terá que substituir o modelo extrativista e extensivo atualmente em uso por sistemas de produção ambientalmente mais sustentáveis, o que exigirá investimentos em novas tecnologias capazes de neutralizar a emissão de metano pelo rebanho de ruminantes sem, entretanto, reduzir a sua produtividade.

Dentro dessa ótica, o Mapa, juntamente com outros ministérios, estabeleceu o programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), cujo objetivo é a redução das emissões antrópicas de gases do efeito estufa (GEE), dando incentivo aos reflorestamentos e à recomposição da cobertura vegetal em áreas degradadas, integração de sistemas de produção e substituição de energia fóssil por renovável. Dentre as metas previstas pelo programa ABC, para o período de 2010 a 2020, estiveram: a) recuperação de uma área de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas; b) incremento do plantio de florestas econômicas em 3 milhões de hectares; c) adoção do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em 4 milhões de hectares. Prevendo, com isso, uma redução de 130 milhões de toneladas de GEE, em equivalente carbono.

O cumprimento das metas de recuperação de pastagens e a ampliação das áreas com ILPF possibilitaria alcançar uma redução de até 51,8 milhões de toneladas de carbono equivalentes ($t\ CO_2eq.$) ao ano, o que representa entre 32% e 39% da meta

total de redução de emissões prevista para o Plano ABC como um todo. Esses são alguns dos resultados do estudo Impactos Econômicos e Ambientais do Plano ABC realizado pelo Observatório ABC, que desenvolveu um modelo econômico-ambiental capaz de simular os efeitos da implementação dessas duas metas do Plano ABC até 2020 (Impactos..., 2017).

Além disso, os resultados desse estudo contribuem com uma primeira projeção dos impactos econômicos e ambientais do Programa ABC, os quais revelam os potenciais benefícios da agricultura de baixa emissão de carbono para o País, tanto na intensificação da produção com redução da pressão sobre os recursos naturais, quanto nos desdobramentos econômicos positivos para a sociedade, ou de baixo custo agregado dessas políticas (Impactos..., 2017)

No tocante ao incremento das áreas de florestas plantadas, os avanços nas pesquisas em relação à definição de espaçamento, clones, nutrição e manejo florestal já foram conseguidos para as áreas de plantios tradicionais. A silvicultura baseada nas espécies do gênero *Eucalyptus*, estimulada na década de 1970 pelos incentivos fiscais associados aos investimentos por parte das indústrias de celulose e papel e siderurgia, tornou o setor florestal fortemente competitivo, principalmente pelo segmento de florestas plantadas. Isso proporcionou enorme sucesso na silvicultura, no melhoramento genético e no desenvolvimento da tecnologia de plantio clonal de eucalipto, tecnologias essas responsáveis pela elevada produtividade florestal alcançada pelo gênero.

Por outro lado, para regiões com pouca ou nenhuma tradição em plantio florestal, ainda se requer o desenvolvimento e a viabilização de tecnologias para obter produtos de qualidade, diversificados e competitivos (Drumond et al., 2016). Essas regiões apresentam, muitas vezes, nível de conhecimento silvicultural e domínio tecnológico bastante rudimentar. Caracterizados, principalmente, pela falta de protocolos silviculturais e também pela ausência de programas de melhoramento genético. Esses aspectos se agravam ainda mais quando se trata da pesquisa com espécies nativas.

Outro grande desafio do projeto é desenvolver tecnologias silviculturais capazes de incentivar a produção diversificada na propriedade, com menor impacto sobre o meio ambiente e, ao mesmo tempo, que possibilitem minimizar as emissões de gases do efeito estufa (GEE). Assim, será necessário adotar estratégias para desenvolver, no curto prazo, sistemas agropecuários que conciliem a produção de alimentos com a conservação ambiental. A adoção dessas práticas promove mudanças na produtividade e na quantidade de produtos da pecuária e de culturas agrícolas e florestais, alterando a oferta destes produtos e, conseqüentemente, o uso da terra. Por sua vez, essas mudanças levam a novos equilíbrios de oferta e demanda que se refletem para todos os setores da economia (Impactos..., 2017)

Dentro desse contexto, os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou sistemas agrossilvipastoris, constituem uma importante estratégia para maximizar

a produção por área e reduzir a emissão de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo conservar os recursos naturais pela integração de atividades agrícolas, pecuárias e florestais. A meta do Mapa com o programa ABC é expandir a utilização dessa tecnologia para quatro milhões de hectares e, com isso, evitar que entre 18 e 22 milhões de toneladas de CO₂ equivalente sejam liberadas.

O sistema integrado Floresta-Pecuária (sistema silvipastoril) tem sido apontado como uma importante alternativa de uso sustentado da terra, principalmente naquelas áreas potencialmente sujeitas à degradação e, também, como uma nova fonte de agregação de valor econômico na propriedade rural, por meio da exploração de madeira (Ribaski; Montoya, 2001; Dias Filho, 2007; Silva et al., 2009; Nicoli et al., 2017; Ribaski, 2019). A reincorporação ao processo produtivo de áreas alteradas, a partir de plantações florestais, pode contribuir significativamente para o aumento da oferta de madeira para múltiplo uso, e diminuir a pressão sobre as florestas nativas.

Diversos resultados de pesquisa comprovam a potencialidade dos sistemas agrosilvipastoris para aplicação no meio rural, pois se constituem em alternativas econômicas, ecológica e socialmente viáveis para o fortalecimento da agricultura familiar, proporcionando o aumento da produção, geração de empregos e, conseqüentemente, de renda dos produtores rurais, sempre primando pelo desenvolvimento sustentável, ou seja, pela produção com respeito ao ambiente (Passos et al., 1992; Oliveira et al., 2000; Ribaski et al., 2009; Nicoli et al., 2017).

Avaliações de desempenho animal e da pastagem em sub-bosque de eucalipto, realizadas em diferentes sistemas silvipastoris no País, evidenciam o grande potencial de produção destes sistemas, observando-se melhoria da qualidade da pastagem sombreada (Carvalho, 1998; Ribaski et al., 2003, 2019; Radomski; Ribaski, 2012), bem como ganhos de peso dos animais (Silva et al., 2009; Giraldo, 2014). Além disso, a presença do componente arbóreo em sistemas silvipastoris contribui para o bem-estar animal (Nicodemo et al., 2018) e redução dos danos provocados por geadas na pastagem, em regiões sujeitas a esse fenômeno (Carvalho, 1998; Joseph et al., 2019).

Contudo, ainda é comum verificar, em condições de propriedades rurais, dificuldades no estabelecimento e no manejo equilibrado entre os componentes agrícola, pecuário e florestal. Isso determina que muitos empreendimentos realizem uma integração temporária, isto é, apenas até o momento em que a árvore limite o crescimento dos outros componentes associados. Todavia, a partir de um bom planejamento e tomadas de decisões corretas, é possível integrar as atividades florestal, agrícola e pecuária com benefícios econômicos e ambientais. O sucesso dessa integração está alicerçado no equilíbrio da exploração dos recursos naturais pelos componentes bióticos deste sistema (Varella et al., 2009, 2016).

O Brasil atravessa um bom momento para adoção e multiplicação do conhecimento relativo aos sistemas integrados de produção, que se tornaram tendência na

última década. Fomentar, por exemplo, a conversão de áreas de pastagens em sistemas silvipastoris usando espécies de rápido crescimento, como as do gênero *Eucalyptus*, entre outras, poderá ser um importante diferencial competitivo do agronegócio brasileiro, tanto para o setor pecuário quanto para ao setor de base florestal, uma vez que estes sistemas apresentam a possibilidade de geração de emprego e incremento da renda com maior eficiência que a pecuária extensiva e, conseqüentemente, maior tendência para oferecer a sustentabilidade social e econômica.

- **Inovações de tecnologias ligadas aos usos tradicionais da madeira para fins energéticos no Brasil (2007-2011).**

Líder: José Otávio Brito

- **Avanços tecnológicos ligados à lenha e ao carvão vegetal (2011-2016).**

Líder: José Otávio Brito

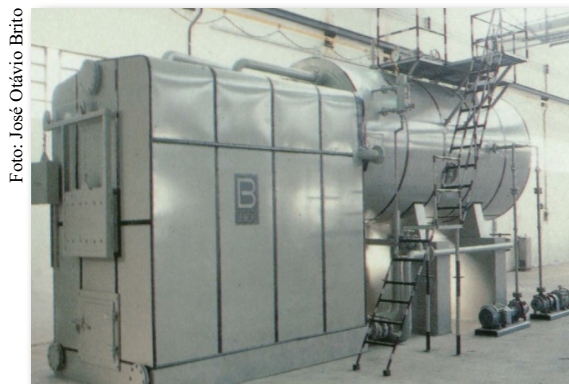


Figura 4. Caldeira de combustão de madeira.

É pleno o conhecimento que a biomassa vegetal de origem florestal, representada particularmente pela madeira, constitui-se num insumo indispensável para o atendimento energético no Brasil. Tal uso concentra-se na produção de carvão vegetal e nos consumos do setor residencial e industrial (Brasil, 2011).

Historicamente, pouca atenção oficial tem sido oferecida à madeira no seu papel como fonte de energia. Isso inclui o desenvolvimento de pesquisa e de tecnologia vinculadas ao seu principal processo de aplicação energética que é a combustão. Situação muito parecida pode ser encontrada para o carvão vegetal, apesar da existência de ações isoladas e intermitentes desenvolvidas por parte da indústria siderúrgica e algumas universidades, que o coloca num patamar um pouco mais acima.

Tais aspectos motivaram a inclusão do projeto “Inovações tecnológicas ligadas aos usos tradicionais da madeira para fins energéticos no Brasil”, como componente do Projeto “Florestas Energéticas” da Embrapa e parcerias, que veio romper a barreira da não inclusão da biomassa vegetal de origem florestal nos planos nacionais estruturados de pesquisa de fontes limpas e renováveis de energia.

O desenvolvimento do projeto componente permitiu a obtenção de importantes resultados, de acordo com os seus objetivos originais. Ofereceu ainda a vantagem de perceber a necessidade de continuidade de estudos adicionais, visando maior avanço nas tecnologias ligadas à lenha e ao carvão vegetal. Em ações futuras, é importante concretizar e ampliar os conhecimentos sobre as questões ligadas à qualidade da biomassa vegetal de origem florestal para energia. Tradicionalmente, o conhecimento da qualidade da madeira é inerente às questões ligadas à seleção de matéria-prima, associados aos seus processamentos industriais, quer seja no campo físico-mecânico ou químico.

Dada à menor importância historicamente oferecida ao uso da madeira para energia, a questão da sua qualidade, inerente à tal aplicação, nunca foi profunda e amplamente considerada. Com o recente crescimento do interesse por tal uso, a qualidade da madeira ganha nova dimensão, particularmente considerando a combustão e a produção de carvão vegetal.

Sem dúvida, o uso da lenha na sua forma *in natura* se destaca em relação às suas aplicações energéticas. No entanto, ainda existem fortes e específicas demandas de informações, quanto ao potencial do seu pré-processamento, de modo a facilitar e ampliar as opções de uso, bem como disponibilizar maior quantidade de energia útil. Nesse contexto inclui-se a secagem, a compactação e a torrefação.

A concentração dos estudos sobre secagem de madeira tem sido voltada para os processos industriais, visando a aplicação da madeira para fins estruturais (Avanços..., 2016a). São raros, sobretudo considerando-se as condições climáticas do Brasil, os resultados de estudos sobre a secagem da madeira para seu uso como lenha, por exemplo. Quando existentes, são derivados de avaliações, onde não foram claramente definidos seus limites experimentais, bem como dotados de um forte conteúdo de empirismo. A demanda por estudos sobre secagem da madeira para energia já se localiza na simples questão de como controlar a umidade, considerando-se o seu empilhamento em condições de campo, após o corte das árvores. A disponibilidade quantitativa e temporal de energia útil pode ser profundamente afetada pelas condições dessa secagem (Avanços..., 2016a).

A compactação da biomassa constitui instrumento importantíssimo considerando o uso da biomassa para energia (Quirino, 1987). No caso da biomassa vegetal de origem florestal, a valorização dos resíduos, provenientes da colheita e do processamento industrial da madeira, ocupa lugar de destaque. Em geral, a compactação compreende os processos de briquetagem e, ou peletização. Apesar de já serem

tecnologias mundialmente bem conhecidas e com importante inserção no Brasil, ainda existem lacunas no campo da compactação, as quais merecem atenção especial. Nesse contexto, inclui-se a ampliação do conhecimento acerca do processo em si e das características dos produtos obtidos, considerando-se a oferta de resíduos de novas origens, do ponto de vista florestal. Também se incluem os resíduos provenientes do uso de novas espécies inseridas no mercado madeireiro, bem como novos tipos de resíduos obtidos da colheita florestal, sejam de florestas plantadas ou de florestas nativas sob regime de manejo sustentado. Além disso, deve-se contemplar o desenvolvimento de ações estratégicas que induzam o estabelecimento e a consolidação de normas e padrões de classificação para produtos compactados no Brasil.

A torrefação compreende a aplicação de calor à biomassa, com temperaturas na faixa entre 200 °C e 300 °C, que permite a obtenção de um material intermediário entre madeira e carvão, com altos rendimentos gravimétricos, num processo que possui baixa demanda energética. Essencialmente, a torrefação se encaixa perfeitamente no âmbito do pré-processamento de resíduos florestais. O produto obtido apresenta vantagens, quando comparado com o material original, como aumento do poder calorífico, diminuição da higroscopicidade, maior estabilização dimensional, maior resistência à degradação biológica, entre outros (Brito, 1993; Pincelli et al., 2002; Almeida et al., 2009). A torrefação é recomendada como pré-tratamento da biomassa antes da mesma ser submetida a diferentes processos, por exemplo, à gaseificação, pois confere uma maior uniformidade em sua característica, o que é altamente recomendável para o respectivo processo. O material obtido torna-se, ainda, mecanicamente menos resistente, o que o torna energeticamente menos exigente, quando submetido à moagem, devido à destruição parcial da sua estrutura fibrosa (Bergman et al., 2005). Essa condição é fundamental para viabilizar o uso da madeira em processos de combustão de materiais na forma de pó. Apesar de alguns avanços no campo da torrefação ocorridos no mundo, ainda não há uma inserção do processo no Brasil, sobretudo considerando a amplitude de possibilidades de oferta de resíduos de diferentes origens, do ponto de vista florestal e madeireiro, sejam os obtidos da colheita, sejam os de florestas plantadas ou nativas sob regime de manejo sustentado. Sob tais cenários, pesquisas sobre torrefação devem ser realizadas.

A combustão compreende o processo mais amplamente conhecido e difundido quanto ao uso da biomassa vegetal de origem florestal. O domínio tecnológico e de aplicação a ele vinculado é muito grande, sobretudo considerando o ambiente dos grandes usuários, que têm fácil acesso aos desenvolvimentos tecnológicos do setor. Esse fato, no entanto, não é totalmente válido para o Brasil, sobretudo se focado nos usuários dos setores residenciais e de pequenas indústrias. Em decorrência do histórico estímulo ao uso de combustíveis fósseis, os estudos sobre o tema têm sido relegados a um plano secundário. No entanto, dados os volumes consumidos de biomassa vegetal, principalmente de lenha, associados às implicações sociais inerentes aos mencionados

setores, ações devem ser conduzidas visando a otimização dos processos e o aumento dos rendimentos energéticos (Avanços..., 2016a). Torna-se, portanto, expressiva, ações envolvendo a avaliação da combustão de materiais de origem florestal, compreendendo a biomassa vegetal in natura ou pré-tratada em processos combinados ou não de compactação, torrefação e carbonização (Avanços..., 2016a). Associe-se a isso o desempenho técnico de equipamentos destinados à combustão desses materiais, visando a obtenção de calor para cocção de alimentos e para atendimento de pequenas indústrias.

Na atualidade, o Brasil detém o maior e mais amplo conhecimento tecnológico no campo da produção e uso do carvão vegetal, principalmente considerando o seu uso para produção siderúrgica. No entanto, ainda existe espaço para melhorias, sendo o maior entrave a alta variabilidade da matéria-prima, considerando diferenças químicas e físicas da madeira (Trugilho et al., 2005). Além do carvão vegetal per si considerando seu rendimento e qualidade, amplia-se a demanda por estudos e avaliações referentes à caracterização de produtos gasosos da carbonização da madeira, incluídos como aspecto importante para o conhecimento de suas composições químicas, potenciais de uso e seus impactos ambientais.

- **Obtenção de derivados energéticos de alto valor agregado a partir de biomassa florestal (2007-2011).**

Líder: Monica Caraméz Triches Damaso

- **Avanços tecnológicos na produção de bio-óleo, gás de síntese, hidrogênio e etanol a partir de biomassa florestal (2011-2016).**

Líder: Monica Caraméz Triches Damaso



Foto: Vivian Chies

Figura 5. Planta de pirólise e gaseificação da Embrapa Agroenergia.

A biomassa lignocelulósica é composta basicamente de três principais frações de polímeros: lignina, hemicelulose e celulose. Diferentemente das matérias-primas açucaradas, nestes materiais os açúcares não estão prontamente disponíveis para conversão ao etanol. Estes precisam ser liberados a partir da celulose e da hemicelulose, mediante um processo de hidrólise. Para viabilizar este processo, no entanto, torna-se necessária a remoção da lignina que envolve estes polissacarídeos e que atua como uma espécie de barreira. Desta forma, a produção de etanol a partir deste tipo de material compreende as seguintes operações principais (Hamelinck et al., 2005): (1) pré-tratamento; (2) hidrólise e (3) fermentação.

O pré-tratamento tem o objetivo principal de aumentar a eficiência do processo de hidrólise enzimática. Isto pode ser alcançado utilizando diferentes princípios, tais como a quebra ou remoção da lignina e, ou da hemicelulose, o aumento da área superficial e a diminuição da cristalinidade da celulose (Mosier et al., 2005). Para uma ou mais dessas ações, diferentes tecnologias de pré-tratamento têm sido estudadas e sua aplicação depende de vários fatores, tais como as características da matéria-prima e das demais operações envolvidas no processo. Dentre os diversos atributos desejáveis para um processo de pré-tratamento, podem ser citados: baixo custo e facilidade de aplicação em escala industrial; minimização da degradação de açúcares e da formação de compostos inibidores; reaproveitamento máximo de subprodutos (como a lignina) e geração mínima de resíduos; não envolver adição de compostos tóxicos às enzimas ou aos microrganismos da fermentação; além de obviamente cumprir seu objetivo principal de aumentar a digestibilidade da matéria-prima (Yang; Wyman, 2008).

Para isto podem ser utilizados métodos físicos, químicos e biológicos, combinados ou não, sendo os termoquímicos e químicos considerados mais eficientes e com maior potencial para aplicação industrial (Alvira et al., 2010).

Pesquisas anteriores indicam a possibilidade de utilizar o lodo da indústria de papel e celulose para a obtenção de etanol, com a vantagem de não ser necessário seu pré-tratamento.

As estruturas da celulose e da hemicelulose apresentam diferentes susceptibilidades ao processo de hidrólise. A celulose apresenta maior resistência e, portanto, é necessária uma etapa adicional de hidrólise, que pode ser ácida (mais severa) ou enzimática. Comparativamente, a hidrólise enzimática normalmente apresenta condições de operação mais brandas, possibilidade de altos rendimentos e minimização da formação de produtos inibidores (Sun; Cheng, 2002).

O processo de hidrólise enzimática da celulose é executado com o auxílio de, pelo menos, três classes de enzimas que atuam de forma sinérgica: endoglucanases (β -1,4-D-glucan-glucanohidrolase), exoglucanases (β -1,4-D-glucan-celobiohidrolase) e β -glucosidase ou celobiase (β -D-glicoside-glucohidrolase). Este complexo de enzimas é chamado de “celulase” ou de “enzimas celulolíticas”. As endoglucanases são responsáveis pela catálise da hidrólise das cadeias de celulose, produzindo polissacarídeos de

menor comprimento. As endoglucanases catalisam especificamente as terminações não redutoras dessas cadeias mais curtas, originando a celobiose. Já as β -glucosidases catalisam a hidrólise da celobiose e outros oligômeros. Com relação à sua origem, as celulases podem ser produzidas por fungos e bactérias (Taherzadeh; Karimi, 2007).

Na etapa seguinte, os açúcares liberados na hidrólise passam por um processo de fermentação para a produção do etanol, sob a ação de um microrganismo. Esta técnica é a mesma que já vem sendo empregada para a conversão dos açúcares da cana-de-açúcar em etanol. A diferença está nos tipos de açúcares liberados. No caso da cana-de-açúcar, os monossacarídeos a serem fermentados são basicamente hexoses. Já no caso das matérias-primas lignocelulósicas, o hidrolisado contém também outros tipos de açúcares. Enquanto a hidrólise da celulose fornece apenas hexoses (glicose), a da hemicelulose fornece hexoses (glicose, manose e galactose) e pentoses (xilose e arabinose). Para a fermentação das hexoses já existe tecnologia totalmente consolidada, porém o mesmo não ocorre com a bio-transformação das pentoses, as quais não são diretamente fermentadas pelos microrganismos tradicionais (*Saccharomyces cerevisiae*, por exemplo). Para contornar este problema, estudos têm sido conduzidos na área de engenharia genética, para desenvolver microrganismos com habilidade de consumir hexoses e pentoses (Jardine et al., 2009).

A fermentação pode ser realizada em etapa posterior à hidrólise enzimática ou simultaneamente a esta. Estes processos são denominados Hidrólise e Fermentação Separadas (“Separate Hydrolysis and Fermentation” - SHF) e Sacarificação e Fermentação Simultâneas (“Simultaneous Saccharification and Fermentation” - SSF). A principal vantagem da configuração SHF é a possibilidade de operar cada etapa (de hidrólise e de fermentação) em condição ótima de temperatura. Já o processo SSF permite: diminuição da inibição da hidrólise enzimática (devido à conversão simultânea da glicose em etanol), além de redução de custos, utilizando somente um equipamento para as operações de hidrólise e fermentação (Olofsson et al., 2008).

Existem duas tecnologias de gaseificação de biomassa, convencional e supercrítica, com vários estágios e produtos. A convencional é de baixa pressão (0,1 MPa), alta temperatura (800-1.500 °C), exige secagem e O_2 ; e a supercrítica é de alta pressão (25 MPa), média temperatura (700 °C) e sem secagem. Os múltiplos estágios e produtos da convencional são: preparação e secagem (Base Seca - BS); separação do ar (O_2/N_2); gaseificador (singás); limpeza (singás limpo, a ser utilizado na geração de energia elétrica); reforma a vapor após purificação e uso de catalisadores caros para produção de substitutos de petróleo pela tecnologia GTL (Gas-to-Liquids); substituição por água (water shift) (gases $CO_2/H_2/CO/CH_4$); PSA (H_2 puro); logística (H_2 líquido, H_2 -duto, cilindro comprimido); sequestro de CO_2 . A tecnologia supercrítica é composta dos seguintes estágios e produtos: pares de tubos ascendentes (pré-aquecedor) e descendentes (reator) aquecidos em uma fornalha similar àquela usada na petroquímica; trocador de calor (recuperação térmica); esfriador; separadores de água/gás de alta e baixa pressão

(água, gases $H_2/CO_2/CO/CH_4$); PSA (H_2 puro pressurizado e gás residual $H_2/CO_2/CO/CH_4$); três bombas de água (para separador de alta, trocador de calor e lama de biomassa); usina termoelétrica - UTE (caldeira, turbina a vapor, condensadores utilizando os gases de combustão da fornalha gerando energia elétrica). A geração de H_2 por gaseificação de biomassa em água supercrítica (H_2 -GBASC/UTE) funciona também como um reservatório energético quando integrado com a rede elétrica (hidráulica, térmica, eólica ou solar), diminuindo a produção da UTE e aumentando o H_2 que fica estocado no H_2 -duto (2 MPa a 10 MPa) e vice-versa. Antal et al. (2000) alcançaram rendimento de 100 g H_2 /kg BS com o uso de carvão ativado como catalisador.

Em 2002, foi implantada a Verena, uma planta piloto na Alemanha, porém os grandes desenvolvimentos estão sendo feitos na planta piloto SKLMF-State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, na Xi'an Jiatong University, Xi'an, Shaanni, na China. Além das vantagens já indicadas, ressaltam-se as seguintes: ASC (Apparent Surface Charge) tem alta constante dielétrica, dissolve todos os componentes da biomassa (inclusive lignina) numa reação homogênea com fácil transferência de massa entre fases; o processo de alta pressão permite separação e purificação do H_2 por PSA e seu despacho ainda em alta pressão (eficiente bombeamento de água em vez de ineficiente compressão de H_2 leve); uso de pares de tubos ascendentes/descendentes com injeção de lama na sua junção superior (diâmetro de 20 mm para laboratório e de 100 mm para indústria) formando baterias paralelas com qualquer capacidade; a reciclagem da água, recuperação de calor e de energia elétrica em turbinas hidráulicas permitem a circulação de grandes volumes de água (95%) em equipamentos grandes, porém não enormes; facilidade de bombeamento da lama com bombas de pares de pistões reversíveis (aberto no enchimento e fechado no bombeamento).

Tecnologias e variáveis operacionais podem ser alteradas para a otimização da produção de bio-óleo e melhoria de sua qualidade em processos de pirólise (Meier; Feix, 1999; Oasmaa; Czernik, 1999; Bridgwater; Peacocke, 2000; Yaman, 2004; Kersten et al., 2005; Huber et al., 2007; Hosoya et al., 2007) e para a produção de gás de síntese em processos de gaseificação (Cao et al., 2006; Wang et al., 2007). O bio-óleo produzido em processos de pirólise tem sido usado como combustível líquido em caldeiras e fornalhas e, algumas vezes, em motores diesel para a produção de calor ou eletricidade (Bridgwater; Peacocke, 2000; Chiaramonti et al., 2007). Entretanto, o bio-óleo é pouco estável, pois possui alto teor de oxigênio (40% a 50%), de água (15% a 30%) e alta acidez (Lappas et al., 2002; Gayubo et al., 2004; Chiaramonti et al., 2007; Corma et al., 2007). Tanto o bio-óleo quanto o gás de síntese são fontes potenciais para obtenção de combustíveis líquidos tais como o diesel, metanol e etanol por via síntese de Fischer-Tropsch, e produtos químicos renováveis no conceito de biorrefinaria. Existem várias instalações de pirólise e de gaseificação de biomassa em operação no Brasil e no mundo, a maioria ainda em escala piloto. A gaseificação com

ar gera um gás com baixo poder calorífico e com até 55% em volume de gás inerte, já com oxigênio ou com mistura de ar e vapor, uma mistura rica em H_2 e CO com alto poder calorífico pode ser obtida. Recentemente, a gaseificação com vapor d'água tem atraído grande interesse devido à produção de mistura gasosa com teor relativamente alto de H_2 , tornando sua aplicação mais interessante em sistemas de cogeração, como turbinas à gás, microturbinas e, até mesmo, células combustíveis, que necessitam de um gás com um poder calorífico da ordem de 10.000 Btu/m³ a 12.000 Btu/m³. A gaseificação alotérmica, com vapor d'água, apresenta como principal vantagem a produção de gás com alto poder calorífico. Entretanto, o processo de gaseificação com vapor d'água é mais complexo, devido à necessidade de uma fonte externa de calor para propiciar a reação endotérmica, exigindo mais pesquisa e desenvolvimento. No caso da tecnologia de gaseificação, o projeto e a operação otimizada dos reatores e a remoção de contaminantes das correntes de gases produzidos (HCl, NH_3 , N_2 , CH_4 e outros hidrocarbonetos, aromáticos e fenólicos, dentre outros) são ainda gargalos tecnológicos a serem transpostos (Sánchez, 2010). Ramzan et al. (2011) apresentaram detalhes sobre modelagem e simulação do processo de gaseificação. As tecnologias de processo citadas ainda se encontram em desenvolvimento, em plantas piloto ou demonstrativas de pequeno porte, com perspectivas favoráveis de que se tornem viáveis no futuro próximo, em virtude da crescente demanda energética e da menor disponibilidade e do custo elevado de combustíveis fósseis.

- **Prospecção, mercado de carbono, impactos e gestão ambiental de florestas com finalidades energéticas (2007-2011).**

Líder: Claudio Cesar de Almeida Buschinelli

- **Avaliação socioambiental e econômica da cadeia produtiva de florestas energéticas e a sua inserção na economia brasileira (2011-2016).**

Líder: Flávio José Simioni

Foto: Claudio Cesar de Almeida Buschinelli



Figura 6. Plantio de eucalipto em Santa Cruz do Sul/RS com manejo para a produção de lenha.

O Brasil tem enorme potencial florestal, mas enfrenta dificuldades para delinear uma política para os segmentos da cadeia produtiva por obstáculos associados às questões ambientais (Serviço..., 2020). Em contrapartida, o setor conta com uma área significativa de florestas plantadas e com tecnologia de ponta para a sua produção e aproveitamento, mas não esperam grandes avanços em termos de incentivos e financiamento para este segmento em um futuro próximo, embora a área plantada com florestas continue crescendo devido à necessidade de abastecimento das indústrias de base florestal, nos próximos anos (Moreira; Oliveira, 2017).

Os diagnósticos iniciais da cadeia produtiva de madeira para energia foram realizados nos trabalhos de Fontes (2005) e de Simioni e Hoefflich (2007). Fontes (2005) utilizou a metodologia do “Programa Sebrae: Cadeias Produtivas Agroindustriais” para a realização do estudo, e concluiu que o segmento de produção de madeira para energia encontrava-se precário e impossibilitado de atender a um aumento da demanda por lenha e carvão, no curto ou médio prazo. Simioni e Hoefflich (2007), em sua análise diagnóstica e prospectiva da cadeia produtiva de energia de biomassa de origem florestal na região do planalto sul de Santa Catarina, detectaram que a cadeia agroindustrial (CAI) da madeira era composta de cinco cadeias produtivas: madeira sólida, painéis, móveis, papel e energia, e que a cadeia produtiva da madeira para energia apresentava uma estreita relação com as demais cadeias produtivas do CAI, devido à utilização do resíduo das demais cadeias produtivas para a geração de energia.

Para se estudar a cadeia produtiva da madeira de eucalipto para energia, deve-se observar a produção florestal como um todo, as suas inter-relações setoriais e espaciais, para então delinear melhor os componentes da cadeia e as suas relações (Produção..., 2016). Isto é necessário devido a madeira de eucalipto ser utilizada para diversas finalidades, inclusive energia, e a demanda por madeira para energia ser atendida por resíduos da indústria florestal, extração de florestas nativas ou plantios florestais com outros gêneros que não o *Eucalyptus*.

A análise econômica de empreendimentos, neste caso os florestais com finalidades energéticas, é de fundamental importância para a correta escolha dos empreendedores na melhor alocação dos seus recursos, seja para se iniciar ou continuar na atividade, constituindo-se em um dos elos fundamentais da cadeia produtiva (Produção..., 2016).

Os indicadores mais utilizados para análise econômica e financeira de empreendimentos florestais são o Valor Presente Líquido (VPL), Valor Esperado da Terra (VET), Benefício Periódico Equivalente (BPE) ou Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA) ou Valor Anual Equivalente (VAE), Taxa Interna de Retorno (TIR), Relação Benefício-Custo (BC) e Custo Financeiro de Produção (CFP). Para que seja possível uma análise da viabilidade econômica dos principais sistemas de produção de florestas com fins energéticos, são necessários a obtenção dos coeficientes técnicos e dos custos de produção (plantio, manutenção, colheita), bem como o comportamento de

crescimento e produção da espécie, e os preços dos produtos gerados (Produção..., 2016).

A matriz insumo-produto apresenta um ferramental que permite analisar a importância de determinado setor e a sua interdependência dos demais no conjunto da economia. Além da análise estrutural do setor, o ferramental analítico também permite a avaliação de aplicações de políticas setoriais, apontando possíveis consequências no setor e no conjunto da economia.

Benefícios potenciais dos resultados advindos do Projeto para a sociedade

As maiores contribuições à sociedade foram o desenvolvimento e disponibilização de tecnologias, publicações de artigos técnicos e científicos; realizações de seminários e *workshops*; orientações de dissertações e teses; treinamento de estudantes de graduação e pós-graduação; apresentação de palestras e outros. No campo tecnológico destacam-se:

Em termos de matéria-prima, o principal benefício foi a ampliação na oferta de genótipos florestais com aptidão energética, adaptados para as diversas regiões brasileiras, para plantios em sistemas de produção puros e integrados. No aspecto das técnicas silviculturais, destacam-se os resultados relacionados aos protocolos silviculturais naquelas regiões com maior carência em informações e tecnologias florestais; aos sistemas de integração (ILPF), representados pela definição de Práticas/Processos Agropecuários, para a definição dos arranjos e manejo do componente florestal, principalmente nos sistemas silvipastoris que apresentaram possibilidade de incremento da renda com maior eficiência que a pecuária extensiva tradicional da região, oferecendo maiores oportunidades para se obter sustentabilidade socioeconômica.

Para as tecnologias inovadoras de conversão de biomassa destacam-se: o desenvolvimento de um processo alternativo de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, uma das etapas de maior desafio tecnológico para a obtenção de etanol lignocelulósico; um processo alternativo para aproveitamento de lodos primários gerados nas empresas de reciclagem de papel, por meio da produção de etanol celulósico; desenvolvimento de metodologia para a determinação de etanol por meio de NIR, possível de ser adaptada por outros usuários; avanços importantes nos conhecimentos relacionados aos temas de produção de etanol celulósico, hidrogênio, gás de síntese e bio-óleo.

Entre as tecnologias geradas para lenha e carvão vegetal destacam-se nas questões tecnológicas: desenvolvimento de fornos de carbonização da madeira com queimador de fumaça para pequenos produtores de carvão; metodologia para identificação da origem do carvão vegetal, que poderá vir a ser um instrumento bastante útil nas ações

de fiscalização; aperfeiçoamento e inovação para a compactação de resíduos florestais e madeireiros, visando maior adensamento energético; identificação da qualidade da madeira e seu efeito na qualidade do carvão vegetal produzido por espécies florestais nativas e de eucaliptos. Para as questões ambientais o projeto contribuiu com tecnologias para a minimização da emissão de gases do efeito estufa, adensamento da madeira para aumentar a densidade energética, entre outros.

No âmbito social o Projeto dirigiu atenção especial ao uso tradicional da madeira nas aplicações domésticas e de pequenos empreendimentos, contribuindo para o fortalecimento do uso sustentável deste recurso que, em muitos locais, é a única fonte energética disponível para a produção de carvão vegetal, cocção de alimentos e aquecimento domiciliar.

Os benefícios gerados, obtidos com os estudos realizados no campo social, econômico e ambiental permitem entender o papel dos insumos energéticos de base florestal no contexto da dinâmica econômica do País, sua importância nas limitações de crescimento da economia brasileira, assim como a dependência de alguns setores econômicos. Com isso, a melhoria da produção na propriedade rural representa um ponto importante na busca da sustentabilidade, tanto pela garantia na qualidade dos produtos, quanto pela menor degradação de recursos naturais.

Visão de futuro e desdobramentos do Projeto

O Projeto em rede “Florestas Energéticas” trouxe uma série de benefícios e oportunidades que tiveram como principal desdobramento a oportunidade de consolidar, por meio da liderança da Embrapa, uma rede multi-institucional e multidisciplinar de pesquisadores, nas quatro regiões brasileiras. Essa equipe, capacitada a desenvolver tecnologias e envolvida em participações de eventos técnico-científicos, comissões públicas e privadas, ações de transferência de tecnologias, contatos com empresas, produtores e assistência técnica, identificou novas demandas de pesquisa que vão além da mera transformação da biomassa florestal em produtos energéticos.

A visão é a ampliação dos estudos de produção de biomassa florestal e sua conversão visando não apenas o uso energético, mas também a geração de produtos químicos e materiais, em um conceito de Biorrefinaria Florestal.

Com base nessa nova visão de cenário e na percepção da equipe, destacam-se, de forma resumida, as seguintes necessidades de pesquisas futuras:

Na produção de biomassa, as pesquisas devem avançar na seleção de espécies florestais e nos ajustes de protocolos silviculturais, tanto para as espécies nativas como exóticas, mais plásticas e adaptadas para usos não apenas energéticos, mas usos múltiplos, que possam ser plantadas tanto em sistemas puros como integrados; avançar na utilização de solos marginais. Além disso, é necessário estabelecer, formar

e manejar áreas de produção de sementes de diversas espécies florestais potenciais para usos em biorrefinarias, em regiões estratégicas do Brasil.

Para os processos de transformação deve-se priorizar estudos de aproveitamento de subprodutos da carbonização da madeira, principalmente no desenvolvimento de novas vertentes para os pirolenhosos e no aproveitamento dos gases da carbonização; desenvolver técnicas para a secagem de madeira; avançar no desenvolvimento de fogões residenciais para cocção de alimentos; definir parâmetros para padronizar o carvão vegetal produzido no Brasil; desenvolver redes neurais artificiais em tecnologia da madeira e avançar nos estudos de produção de *pellets* para uso em pequenas e médias indústrias cerâmicas; desenvolver e avaliar novas rotas tecnológicas para a produção de compostos químicos e materiais com alto valor agregado, a fim de aumentar a sustentabilidade e competitividade das indústrias de papel e celulose e afins; obtenção e, ou conversão de açúcares em produtos como: polióis, ácidos orgânicos e oligossacarídeos; proposição de novas alternativas de aproveitamento para resíduos da indústria de papel e celulose; e elaboração de diferentes materiais para construção civil, entre outras.

Estimulada com isso, a Embrapa Florestas iniciou a elaboração de um novo projeto para explorar todo o potencial de uso da biomassa florestal em um contexto mais amplo, o de Biorrefinaria Florestal, sustentado em quatro desafios tecnológicos: matéria-prima, energia, materiais e produtos químicos. Esse novo foco é baseado em um cenário mais sustentável tecnologicamente e com maiores possibilidades de mercado.

Referências

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 12 p.
- ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2011**: ano base 2010. Brasília, DF, 2011. 130 p.
- ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed on microsamples of three Eucalyptus species. **Holzforschung**, v. 63, p. 80-88, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/HF.2009.026>.
- ALVIRA, P.; TOMÁS-PEJÓ, E.; BALLESTEROS, M.; NEGRO, M. J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 13, p. 4851–4861, 2010. DOI: <https://10.1016/j.biortech.2009.11.093>.
- ANTAL, M. J.; ALLEN, S. G.; DAI, X.; SHIMIZU, B.; TAM, M. S.; GRONLI, M. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 39, p. 4024-4031, 2000. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie000511u>.

AVANÇOS tecnológicos ligados à lenha e ao carvão vegetal [Brasília, DF: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz], 2016a. Projeto componente macroprograma 1. Líder do projeto: Jose Otavio Brito.

AVANÇOS tecnológicos na produção de bio-óleo, gás de síntese, hidrogênio e etanol a partir de biomassa florestal. [Brasília, DF: Embrapa Agroenergia], 2016b. Projeto componente macroprograma 1. Líder do projeto: Mônica Caramez Triches Damaso.

BERGMAN, P.; BOERSMA, A.; KIEL, J.; PRINS, M. J.; PTASINSKI, K.; JANSSEN, F. J. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. In: WORLD CONFERENCE AND TECHNOLOGY EXHIBITION ON BIOMASS FOR ENERGY, INDUSTRY AND CLIMATE PROTECTION. 2., Rome, 2005. **Proceedings** [...]. Rome: ETA, 2005. p. 78–82.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2011**: ano base 2010: resultados preliminares. Rio de Janeiro, 2011.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2019**: relatório síntese: ano base 2018. Rio de Janeiro, 2019. 67 p.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Cenários de demanda para o PNE 2050**. Rio de Janeiro, 2018. 34 p.

BRIDGWATER, A. V.; PEACOCKE, G. V. C. Fast pyrolysis processes for biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41–73, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00007-6).

BRITO, J. O. Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993. Curitiba. **Anais** [...]. Curitiba: SBS/ SBEF, 1993. p. 774.

CAO, Y.; WANG, Y.; RILEY, J. T.; PAN, W-P. A novel biomass air gasification process for producing tar-free higher heating value fuel gas. **Fuel Processing Technology**, v. 87, p. 343-353, 2006. DOI: <https://10.1016/j.fuproc.2005.10.003>.

CARDOSO, M. T.; OLIVEIRA, A. C.; BARCELOS, D. C.; VITAL, B. R.; JACOVINE, L. A.; DAMASIO, R. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução de poluentes. **Cerne**, v. 16, p. 115-124, 2010.

CARVALHO, M. M. **Arborização de pastagens cultivadas**. Juiz de Fora: Embrapa CNPGL, 1998. 37 p. (Embrapa CNPGL. Documento, 64).

CHIARAMONTI, D.; OASMAA, A.; SOLANTAUSTA, Y. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, p. 1056-1086, 2007. DOI: <https://10.1016/j.rser.2005.07.008>.

CORMA, A.; HUBER, G. W.; SAUVANAUD, L.; CONNOR, P. O. Processing biomass-derived oxygenates in the oil refinery: catalytic cracking (FCC) reaction pathways and role of catalyst. **Journal of Catalysis**, v. 247, n. 2, p. 307-327, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2007.01.023>.

CRÉDITO de carbono: MDL. **BiodieselBR**, 6 mar. 2012. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/credito-de-carbono/mdl/credito-carbono>. Acesso em: 1 maio 2020.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens**: processos, causas e estratégias de recuperação. 3. ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 190 p.

DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R. de; RIBASKI, J. **Eucalipto no Semiárido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2016. 42 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 276; Embrapa Florestas. Documentos, 297). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/151702/1/SDC276.pdf>.

- FONTES, A. A. **A cadeia produtiva da madeira para energia**. 2005. 134 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- GAYUBO, A. G.; AGUAYO, A. T.; ATUTXA, A.; AGUADO, R.; BILBAO, J. Transformation of oxygenate components of biomass pyrolysis oil on a HZSM-5 zeolite. I. Alcohols and phenols. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 43, n. 11, p. 2610-2618, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie030791o>.
- GERMOPLASMAS para Expansão da Base Florestal Energética. [Brasília, DF: Embrapa Florestas], 2016. Projeto componente macroprogama 1. Líder do projeto: Paulo Eduardo Telles dos Santos.
- GIRALDO, J. F. O. **Efecto de la cobertura arbórea sobre la ganancia de peso y el desempeño reproductivo de vacas brahman en trópico bajo**. 2014. 157 f. Tesis (Magister em Ciencias Animales) - Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- HAMELINCK, C.; HOOIJDONK, G.; FAAIJ, A. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 384-410, 2005. DOI: <https://10.1016/j.biombioe.2004.09.002>.
- HOSOYA, T.; KAWAMOTO, H.; SAKA, S. Pyrolysis behaviors of wood and its constituent polymers at gasification temperature. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 78, p. 328–336, 2007. DOI: <https://10.1016/j.jaap.2006.08.008>.
- HUBER, G. W.; O'CONNOR, P.; CORMA, A. Processing biomass in conventional oil refineries: production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils in heavy vacuum oil mixtures, **Applied Catalysis A: General**, v. 329, p. 120–12, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2007.07.002>.
- IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2019**. Brasília, DF, 2019. 80 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 25 maio 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>. Acesso em: 1 jun. 2020.
- IMPACTOS econômicos e ambientais do Plano ABC: relatório completo. [São Paulo]: Fundação Getúlio Vargas, Escola de Economia de São Paulo, 2017. Projeto Observatório ABC.
- JARDINE, J. G.; DISPATO, I.; PERES, M. R. **Considerações sobre biodiesel como biocombustível alternativo ao diesel**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2009. 25 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Documentos, 93). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/17275/1/doc93-1.pdf>.
- JOSEPH, L.; SCHMITT FILHO, A.; SINISGALLI, P.; FARLEY, J.; ZAMBIAS, D. Sistemas silvipastoris e serviços ecossistêmicos: a visão dos produtores de leite do Sul do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 3, 2019. DOI: <https://10.19084/rca.17116>.
- KERSTEN, S. R. A.; WANG, X.; PRINS, W.; VAN SWAAIJ, W. P. M. Biomass pyrolysis in a fluidized bed reactor. Part 1. Literature review and model simulations. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 23, p. 8773–8785, 2005.
- LAPPAS, A. A.; SAMOLADA, M. C.; IATRIDIS, D. K.; VOUTETAKIS, S. S.; VASALOS, I. A. Biomass pyrolysis in a circulating fluid bed reactor for the production of fuels and chemicals. **Fuel**, v. 81, n. 16, p. 2087-2095, 2002. DOI: [https://10.1016/S0016-2361\(02\)00195-3](https://10.1016/S0016-2361(02)00195-3).

- MEIER, D.; FAIX, O. State of the art of applied fast pyrolysis of lignocellulosic materials: a review. **Bioresource Technology**, v. 68, p. 71–77, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00086-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00086-8).
- MESA PÉREZ, J. M. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização**. 2004. 189 f. Tese (Doutorado em Construções Rurais e Ambiente) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MODERNIZAÇÃO da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano de Siderurgia. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015.
- MORA, A. L.; GARCIA, C. E. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 112 p.
- MOREIRA, J. M. M. A. P.; OLIVEIRA, E. B. de. Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais. In: OLIVEIRA, Y. M. M. de; OLIVEIRA, E. B. de (ed.). **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Cap. 1. p. 11-20.
- MOSIER, N.; WYMAN, C.; DALE, B.; ELANDER, R.; LEE, Y. Y.; HOLTZAPPLE, M.; LADISCH, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 96, p. 673-686, 2005. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>.
- NICODEMO, M. L. F.; GARCIA, A. R.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; PACIULLO, D. S. C. **Desempenho, saúde e conforto animal em sistemas silvipastoris no Brasil**. São Carlos, SP: Embrapa, 2018. 44 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 129).
- NICOLI, C. M. L.; PACHECO, A. R.; REIS, C. F.; VENTUROLI, F. Income diversification through a crop-livestock-forest integration system in the Midwest Brazilian Region. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 7, p. 374-385, 2017. DOI: 10.17265/2161-6264/2017.06.002.
- OASMAA, A.; CZERNIK, S. Fuel oil quality of biomass pyrolysis oils: state of the art for the end user. **Energy Fuels**, v. 13, n. 4, p. 914–921, 1999.
- OLIVEIRA, A. C. **Produção sustentável de carvão vegetal**. Viçosa, MG, 2013. v. 1. 39 p.
- OLIVEIRA, D. de.; SCOLFORO, J. R. S.; SILVEIRA, V. P. Análise econômica de um sistema agro-silvo-pastoril com eucalipto implantado em região de Cerrado. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 1, p. 1-19. 2000. DOI: <https://doi.org/10.5902/19805098392>.
- OLOFSSON, K.; BERTILSSON, M.; LIDÉN, G. A short review on SSF-an interesting process option for ethanolproduction from lignocellulosic feedstocks. **Biotechnology for Biofuels**, p. 1- 14, 2008. DOI: <https://10.1186/1754-6834-1-7>.
- OS PAÍSES que mais emitiram gases de efeito estufa nos últimos 165 anos. São Paulo: WRI Brasil, 2019. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/04/ranking-paises-que-mais-emitem-carbono-gases-de-efeito-estufa-aquecimento-global>. Acesso em: 6 jul. 2020.
- PASSOS, C. A. M.; FERNANDES, E. N.; COUTO, L. Plantio consorciado de *Eucalyptus grandis* com milho no Vale do Rio Doce, Minas Gerais. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ECONOMIA E PLANEJAMENTO FLORESTAL, 2., 1991, Curitiba. **Anais [...]**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ, 1992. v. 1. p. 409-421.

PINCELLI, A. L. P. S.; BRITO, J. O.; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorreificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v. 61, p. 122–132, 2002.

PRODUÇÃO e conversão sustentável de biomassa em energia. [Brasília, DF: Embrapa Florestas], 2016. Projeto macropograma 1. Líder do projeto: Antonio Francisco Jurado Bellote.

QUIRINO, W. F. Compactação de resíduos para uso energético. In: CICLO DE SEMINÁRIOS “SITUAÇÃO DA LENHA NO BRASIL”, 1987, Rio de Janeiro. [Anais [...]]. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 1987. 16 p.

RADOMSKI, M. I.; RIBASKI, J. Fertilidade do solo e produtividade da pastagem em sistema silvipastoril com *Grevillea robusta*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 69, p. 53, 2012.

RAMZAN, N.; ASHRAF, A.; NAVEED, S.; MALIK, A. Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: a comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 3962-3969, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.005>.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; PAULA, L. E. de R. e; FARIA, A. L. R. Secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. **Cerne**, v. 16, p. 41-47, 2010.

REZENDEZ, M. E. Tecnologia mineira transforma fumaça em fertilizantes e alimentos. **Revista Fapemig**, 2002.

RIBASKI, J. **Avaliação do desempenho silvicultural e econômico de cinco materiais genéticos de *Eucalyptus* em sistema silvipastoril, no bioma Pampa do Rio Grande do Sul**. Colombo: Embrapa Florestas, 2019. 21 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 434).

RIBASKI, J.; MONTOYA, L. J. Sistemas silvipastoris desenvolvidos na Região Sul do Brasil: a experiência da Embrapa Florestas. In: CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J.; CARNEIRO, J. C. (ed.) **Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite; Brasília, DF: FAO. 2001. p. 205-233.

RIBASKI, J.; RADOMSKI, M. I.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V. Sistemas silvipastoris em propriedades rurais no Noroeste do Estado do Paraná. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 705-714.

RIBASKI, J.; RAKOCEVIC, M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V. Avaliação de um sistema silvipastoril com eucalipto (*Corymbia citriodora*) e braquiária (*Brachiaria brizantha*) no noroeste do Paraná. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 8., 2003, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2003.

RIBASKI, S. A. G.; HOEFLICH, V. A.; RIBASKI, J. Sistemas silvipastoris como apoio ao desenvolvimento rural para a região Sudoeste do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 60, p. 27-37, 2009.

SÁNCHEZ, C. G. (org.) **Tecnologia da gaseificação da biomassa**. Campinas: Átomo, 2010.

SCHERER, W. G. S. **Levantamento dos níveis de produção de aço e ferro-gusa, cenário em 2020: ênfase: uso da energia gerada na combustão dos gases da carbonização**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2014. 33 p.

YAMAN, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 651–671, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00177-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00177-8).

YANG, C. E.; WYMAN, C. E. Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 2, n. 1, p. 26-40, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.49>.